

УДК 670.191.33

## ВИЯВЛЕННЯ МІКРОДЕФЕКТІВ НА ПОВЕРХНІ КОРОДОВАНОЇ СТАЛЕВОЇ ТРУБИ

П. О. МАРУЩАК<sup>1</sup>, Я. В. ЛИТВИНЕНКО<sup>1</sup>, В. О. ДЗЮРА<sup>1</sup>,  
Р. Т. БИЦАК<sup>2</sup>, М. С. ПОЛУТРЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя;

<sup>2</sup> Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Кількісно оцінено мікромеханізми біокорозійного пошкодження зразків трубної сталі 17Г1С-У шляхом поєднання підходів профілометрії та механіки руйнування. Розвинуто методи обчислення коефіцієнтів концентрації напружень як параметрів корозійних мікроконцентраторів напружень. Вдосконалений підхід апробовано на профілограмах кородованої трубної сталі. Обґрунтовано, що з урахуванням концентрації напружень в околі мікронадрізів, якими є заглибини профілограм, можна оцінити безпечні (допустимі) мікрокорозійні пошкодження.

**Ключові слова:** біокорозія, аналіз профілограм, діагностування, концентрація напружень.

**Вступ.** Сульфатвідновлювальні бактерії (СВБ) – одна з причин локальних корозійних пошкоджень та виразок на стінках магістральних газопроводів. Саме вони зумовлюють анаеробну катодну деполаризацію, за якої залізо є анодом, через що суттєво збільшується швидкість руйнування труби [1, 2] і, крім того, підтримують активність сульфиду заліза як катода.

У багатьох працях розглядали зміну мікрорельєфу як ознаку пошкоженості поверхні конструкцій, розроблено моделі самоорганізації їх складників. Доведено, що усереднені характеристики стану поверхні не завжди чутливі до варіації геометричних параметрів мікрорельєфу. Отже, одним з основних завдань залишається пошук інформативних параметрів оцінювання мікрогеометрії поверхні та створення автоматизованих алгоритмів їх обчислення [3–5].

Досліджуючи механічні характеристики тіл з мікрогеометричними неоднорідностями поверхні, слід враховувати їх форму, розміри, кількість та взаємне розташування. У багатьох випадках силове навантаження елементів конструкцій змінюється в часі, тому актуально вивчити концентрацію напружень в околі мікрорелефектів [6].

У низці праць зроблено висновок про обмежену інформативність стандартизованих параметричних критеріїв оцінювання мікрогеометрії поверхні для вирішення діагностичних та оптимізаційних завдань [7–11]. Вивчаючи біокорозування поверхонь трубної сталі 17Г1С-У, можна виявити найбільш пошкоджені ділянки, встановити їх фізико-механічні особливості за зміною мікрогеометрії та формуванням мікрозаглибин – мікронадрізів, вершини яких мають певний радіус, а отже, й коефіцієнт концентрації напружень [7]. Таке припущення є передумовою створення автоматизованого діагностичного підходу до оцінювання стану біокородованих поверхонь, який використовує традиційні методи вимірювання шорсткості та враховує радіуси концентраторів напружень – заглибин мікрорельєфу. Відомі окремі публікації [8, 9] з тривимірної реконструкції поверхні за дво-

вимірними зображеннями для аналізу матеріалів з пітингами, проте числово не проаналізовано їх вплив на локалізацію напружень.

Отже, на нашу думку, автоматизований опис стану поверхні для оцінки накопичення дефектності під час біокорозії та її пошкодженості внаслідок концентрації напружень потребує доопрацювання. Нижче розвинуто метод комплексного оцінювання мікрогеометрії поверхні та проаналізовано розвиток мікроконцентраторів напружень трубної сталі, пошкодженої біокорозією.

**Методика дослідження.** Більшість методів оцінювання стану кородованих поверхонь ґрунтується на параметричному описі мікрогеометрії, коли зміну їх мікрорельєфу визначають за кількома стандартизованими параметричними критеріями:  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_y$  [3, 7]. За отриманими результатами важко кількісно порівняти концентратори напружень різних поверхонь. Досліджували призматичні зразки зі сталей 17Г1С-У та 20 розміром  $10 \times 30 \times 1$  mm, вирізані з труби у вихідному стані дисковою фрезою з водяним охолодженням, щоб уникнути змін мікроструктури в зоні оброблення. Середовище інокулювали накопичувальною культурою СВБ, що виділялась з продуктів корозії в зоні локальних пошкоджень. Клітини СВБ роду *Desulfovibrio sp.* шт. Київ-10 вирощували в рідкому середовищі Постгейта “В” у термостаті при  $28^\circ\text{C}$  упродовж 14 діб. Чисті колонії сульфатредукторів отримували у напіврідкому середовищі Постгейта “В” шляхом посіву за десятикратних розведень. Додатково вносили в тест-системи інгібітори, якими слугували органічні нітрогеновімісні сполуки: інг. 1 – 1,8-діоксо-3,3,6,6,9-пентаметил-10-феніл-1,2,3,4,5,6,7,8,9,10-декагідроакридин; інг. 2 – гексаметилдодециламоній хлорид. Контрольним було стерильне поживне середовище Постгейта “В”. Час експозиції зразків 62 доби. Швидкість корозії визначали гравіметрично. Використовували кілька схем дослідження біокорозії (табл. 1).

**Таблиця 1. Схеми випробувань та швидкість біокорозії зразків зі сталі 17Г1С-У**

Схеми випробувань	Середовище	$K_{gr}$ , mg/(dm <sup>2</sup> ·days)
1	Постгейта	1,6
2	Постгейта + СВБ	1,6
3	Постгейта + СВБ + 0,5% інг. 1	4,9
4	Постгейта + СВБ + 1% інг. 1	1,1
5	Постгейта + СВБ + 0,5% інг. 2	0,3
6	Постгейта + СВБ + 1% інг. 2	0,5

Оцінювали шорсткість поверхні зразків у вихідному стані та після випробувань у біокорозійному середовищі за середнім арифметичним відхиленням профілю ( $R_a$ ), найбільшою висотою його нерівностей ( $R_y$ ) або висотою профілю за 10 точками ( $R_z$ ) поверхні. Параметри шорсткості визначали згідно з ГОСТ 2789-73.

**Взаємозв'язок між шорсткістю та коефіцієнтом концентрації напружень.** Слід зауважити, що під час експлуатації руйнування може розпочатись у матеріальній точці – вершині мікронадрізу (у нашому випадку – заглибині рельєфу поверхні), якщо  $\overline{K_t} > [K_t]$ , де  $K_t$  – ефективний коефіцієнт концентрації напружень, а  $[K_t]$  – гранично допустимий.

Оскільки коефіцієнт  $[K_t]$  є функцією як допустимої глибини западини профілограми  $H_t$ , так і радіуса її вершини  $[r]$ , а оцінювання безпечності ділянки профілограми щодо концентрації напружень ґрунтується на обчисленні радіуса заглибин її профілю, то розглядатимемо саме заглибини біокорозійного походжен-

ня, в яких під час експерименту накопичувались бактерії, слиз та продукти їх життєдіяльності.

Як правило, щоб оцінити мікрогеометрію металевих поверхонь, використовують параметри шорсткості, зокрема  $R_a$  та  $R_z$ . Проте вони “усереднюють” характеристики поверхні, оскільки поверхні із однаковими їх значеннями можуть мати різні експлуатаційні властивості [5, 11, 12]. Тому пропонуємо алгоритм обчислення усередненого радіуса мікрозаглибини рельєфу, що доповнить відомі підходи й підвищить їх інформативність (рис. 1) [4, 5].

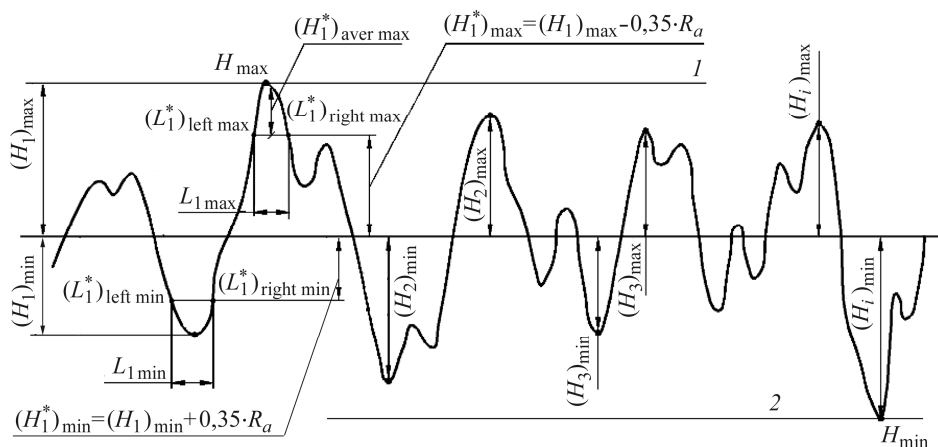


Рис. 1. Профілограма поверхні зразків зі сталі 17Г1С-У:  
1 – лінія виступів; 2 – лінія впадин.

Fig. 1. Profilogram of the surface of the 17Г1С-У steel specimens:  
1 – line of projections; 2 – line of cavities.

На базовій довжині ( $L$ ) аналізованої ділянки оцінювали параметри мікрорельєфу, при цьому  $L = \Delta t \cdot N$ , де  $\Delta t$  – крок дискретизації. Параметри шорсткості обчислювали від середньої лінії профілю  $H_{aver}$ , що проведена так, щоб у межах аналізованої довжини середнє квадратичне відхилення від цієї лінії до базового профілю було мінімальним:

$$H_{aver} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i.$$

Середнє арифметичне відхилення профілю визначали, усереднюючи абсолютні значення відхилень у межах базової довжини:

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |H_i|,$$

де  $N$  – кількість дискретних відліків профілограми;  $H_i$  –  $i$ -ті значення профілю.

Також розраховували найбільшу висоту нерівностей профілю  $R_y$ , як відстань між лініями виступів і западин у межах базової довжини:

$$R_y = |H_{max} - H_{min}|,$$

де  $H_{max}$  – висота найбільшого виступу профілю;  $H_{min}$  – глибина найбільшої його впадини.

Параметр  $R_z$  визначали як суму середніх абсолютних значень висот п’яти найбільших виступів і глибин п’яти найглибших западин профілю в межах базової довжини:

$$R_z = \frac{1}{5} \left[ \sum_{i=1}^5 (H_i)_{\max} + \sum_{i=1}^5 |(H_i)_{\min}| \right],$$

де  $(H_i)_{\max}$ ,  $(H_i)_{\min}$  – п'ять локальних максимумів (вершин) і п'ять локальних мінімумів (западин) профілограми.

Щоб оцінити вплив мікрогеометрії профілю на концентрацію напружень, визначали радіуси  $\rho_{i \min}$  заглибин мікрорельєфу аналізованої профілограми. Виконали програмний “зріз” профілю западини на відстані  $0,35R_a$  [13]. Одержані значення усереднили та одержали значення приведенного радіуса  $\bar{\rho}$  для п'яти найглибших западин рельєфу:

$$\bar{\rho} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \rho_{i \min},$$

де  $\rho_{i \min}$  – радіуси западин.

За програмними “зрізами” профілів западин визначали координати точок лівої та правої меж хорд, необхідних для обчислення радіусів западин:

$$(H_i^*)_{\min} = (H_i)_{\min} + 0,35 \cdot R_a, \quad i = \overline{1,5}.$$

Розраховували координати точок меж хорд западин рельєфу  $(L_i^*)_{\text{left min}}$ ,  $(L_i^*)_{\text{right min}}$ ,  $i = \overline{1,5}$  та їх довжини:

$$l_{i \min} = (L_i^*)_{\text{right min}} - (L_i^*)_{\text{left min}}, \quad i = \overline{1,5}.$$

Значення умовних локальних мінімумів  $(H_i^*)_{\text{aver min}}$  западин рельєфу

$$l_{i \text{ aver min}} = l_{i \min} / 2.$$

Оцінювали висоти від хорд до умовних локальних екстремумів для западин рельєфу:

$$h_{i \min} = (H_i^*)_{\text{aver min}} - (H_i^*)_{\min}, \quad i = \overline{1,5},$$

а також радіуси

$$\rho_{i \min} = \frac{h_{i \min}}{2} + \frac{l_{i \min}^2}{8h_{i \min}}, \quad i = \overline{1,5}.$$

**Метод обчислення радіусів заглибин мікрорельєфу.** Відомі алгоритми опрацювання профілограм поверхні рельєфних утворень передбачають визначення радіусів півкіл, вписаних у западини рельєфу [7, 13, 14]. На практиці форма рельєфу відмінна від ідеалізованих півкіл, що ускладнює пошук осі їх симетрії, а в окремих випадках одержують завищені значення радіусів. Це актуально для корозійних рельєфних утворень, оскільки мікророзійні концентратори достатньо неоднорідні за профілем. Тому в алгоритмі введено можливість адаптуватись під час визначення радіусів півкіл, які повинні вписатись у форму рельєфних утворень (рис. 2).

На початковому етапі за опрацьованим методом, подібно до відомих підходів [7, 13], визначали екстремуми  $(H_i)_{\min}$ , що відповідають мінімумам заглибин профілю. Далі обчислювали рівень  $(H_i^*)_{\min} = (H_i)_{\min} + 0,35 \cdot R_a$  [13], значення якого (для цього прикладу) знаходились між продискретизованими (світлі точки  $A, B$  на рис. 2) і непродискретизованими (темні, наприклад, точка  $D$ ) точками сиг-

налу. Далі визначали хорду  $CD$  (див. рис. 2а), виявляючи найближчу продискретизовану точку профілю до точок  $A$  або  $B$ . У нашому випадку – це точка  $D$ . Точку  $C$  визначили як дві довжини відрізка  $OD$  між продискретизованими точками сигналу. Хорду  $CD$  використали для визначення радіуса кола. Такий алгоритм дієвий для окремих рельєфних утворень профілю з округлою вершиною.

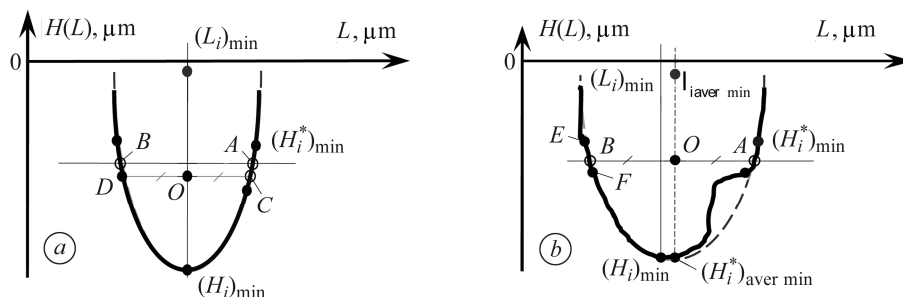


Рис. 2. Схема вимірювання радіуса окремої западини рельєфного утворення:  $a$  – за відомим підходом;  $b$  – за запропонованим.

Fig. 2. Scheme of measurement of a radius of separate cavity of relief formation:  $a$  – known approach;  $b$  – proposed method.

Для рельєфних утворень з неколоподібною вершиною запропоновано інший алгоритм, зокрема, після визначення  $(H_i^*)_{\min} = (H_i)_{\min} + 0,35 \cdot R_a$  [13] перераховували максимум  $(H_i^*)_{\text{aver min}}$ , відносно якого провели вісь симетрії і обчислили радіус концентратора. Максимум перераховували, розділяючи хорду  $AB$  на дві однакові частини. Центр розбиття  $O$  хорди  $AB$  визначав координату на осі  $L$ , для якої встановлювали мінімум. Координати точок хорди  $AB$  знаходили як перетин двох прямих відповідно для точок  $A$  та  $B$ . Зокрема, точку  $B$  визначали як перетин прямих  $AB$  та  $EF$ . Такий підхід розширює відомий й універсальніший для опису западин корозійного мікрорельєфу. На рис. 3 подано типові приклади кількісного оцінювання мікрогеометрії плоских поверхонь зразків зі сталі 17Г1С-У за допомогою приладу 3D Optical Surface Metrology System Leica DCM8 та розрахунку коефіцієнтів  $K_t$  та  $K_f$ . Цим методом можна обробляти западини практично будь-якого складного рельєфу [12].

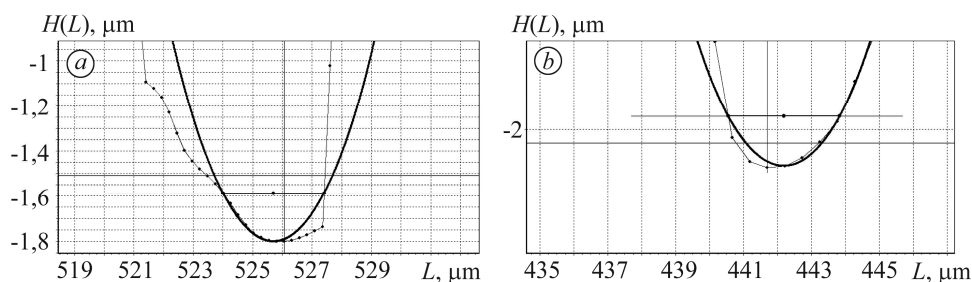


Рис. 3. Приклади обчислення радіуса западин мікрорельєфу біокородованої сталі 17Г1С-У:  $a$  – з правою асиметрією;  $b$  – з лівою.

Fig. 3. Examples of the calculation of the radius of micro-relief of the 17Г1С-У steel after boicorrosion:  $a$  – with right-hand asymmetry;  $b$  – with left-hand.

Проаналізували морфологічну структуру поверхні зразків за морфометричними характеристиками мікронерівностей. Зокрема, за шорсткістю поверхонь та даними профілограм врахували вплив форми западин профілю на локалізацію

напружень в околі таких дефектів; для автоматизації досліджень мікрогеометрії зразків створили алгоритм та програмне забезпечення, за яким оцінили параметри мікронерівностей профілю поверхонь, зокрема, радіуси западин рельєфу ( $R_{\min}$ ). Виявили, що зі зменшенням теоретичного коефіцієнта концентрації напружень розмір безпечного тріщиноподібного мікрodefекту збільшується.

**Коефіцієнти концентрації напружень.** У початковому стані шорсткість поверхні зразків  $R_a = 0,32 \dots 0,63 \text{ }\mu\text{m}$ , або  $R_z = 2,07 \dots 4,37 \text{ }\mu\text{m}$ . Після біокорозійного впливу вона зростає, проте вкрай неоднорідно за різних схем випробувань (табл. 2). На корозію суттєво впливають мікрозадири та напливи металу внаслідок фрезерування.

Слід зазначити, що розглянуті параметри для зразків за схем досліджень 1–6 (табл. 2) змінюються подібно, що свідчить про їх кореляційний зв'язок. Водночас вони описують лише загальну тенденцію зростання шорсткості, яка є лише інтегральною характеристикою корозійного пошкодження [15, 16] і придатна для оцінки ділянок, де корозія відносно рівномірна та відсутня значна локалізація біокорозії.

**Таблиця 2. Шорсткість початкової (у чисельнику) та пошкодженої (у знаменнику) поверхні зразків зі сталі 17Г1С-У за різних схем випробувань**

Схеми випробувань	$R_z$	$R_a$	$R_y$
	$\mu\text{m}$		
1	4,08 / 5,45	0,57 / 0,81	5,05 / 6,73
2	3,09 / 7,19	0,53 / 0,99	3,63 / 9,39
3	3,67 / 14,51	0,63 / 2,68	4,69 / 16,95
4	4,37 / 4,74	0,56 / 0,75	6,90 / 5,48
5	2,07 / 8,49	0,32 / 1,04	2,56 / 11,52
6	3,79 / 8,99	0,59 / 1,18	4,65 / 12,15

\* У чисельнику – початкове значення, в знаменнику – після біокорозії.

Виявили, що з введенням 0,5% інгібіторів 1 та 2 шорсткість поверхні не стабілізується, а навпаки найбільше зростання  $R_a$  та  $R_z$  виявлено для схеми 3: у 4,25 та 3,95 рази відповідно. Лише за концентрації інгібіторів 1%, хоча і не відбулося повної її стабілізації, але локалізація корозії менша. Параметри шорсткості лише в першому наближенні описують стан поверхні, тому оцінювали концентрацію напружень кородованих поверхонь за гіпотезою плоских перерізів. Такий підхід дає можливість встановити зв'язок між шорсткістю та кількісними параметрами механіки руйнування, а отже, зіставити схильність поверхонь до зародження тріщин. Коефіцієнт  $\overline{K}_t$  для кородованих поверхонь визначали, урахувавши геометрію западин профілю, зокрема середній радіус [7]:

$$\overline{K}_t = 1 + n \left( \frac{R_a}{\bar{\rho}} \right) \left( \frac{R_y}{R_z} \right),$$

де  $\bar{\rho}$  – середній радіус заглибин профілю;  $n$  – коефіцієнт урахування типу навантаження ( $n = 2$  за статичного розтягу).

Обчислювали ефективний коефіцієнт концентрації напружень для циклічного навантажування (втоми)  $\overline{K}_f$  [7]:

$$\overline{K}_f = 1 + q(\overline{K}_t - 1).$$

Чутливість до концентрації напружень ( $q$ ) визначали через ефективний радіус западини профілю поверхні ( $\overline{\rho}$ ) [7]:

$$q = \frac{1}{(1 + \gamma/\overline{\rho})},$$

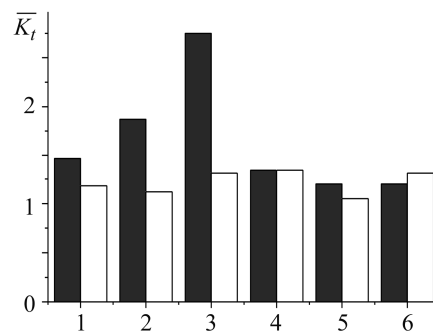
де  $\gamma$  – стала матеріалу, яка враховує умовну границю міцності  $\sigma_B$  [4].

Виявили, що СВБ (схема 2 у табл. 1) спричиняють зростання значень  $\overline{K}_t$  від 1,12 до 1,87. Після введення 0,5% інг. 1 корозія інтенсифікується й збільшуються глибина та гострота корозійних пошкоджень поверхні сталі. З ростом концентрації інг. 1 до 1% значення  $\overline{K}_t$  знижується до 1,35. У всьому діапазоні концентрацій інг. 2 воно становить 1,2. На нашу думку, це свідчить про розосередження бактерій по поверхні зразків та зниження їх біохімічної активності, а отже, про бактерицидний вплив інгібітора. Крім того, обчислювали параметр  $\overline{K}_f$ , який для дослідженого мікрорельєфу є малочутливий та змінюється від 1 до 1,02.

Під час силового навантаження руйнівні процеси починаються за появи мікропластичності в околі вершини мікрodefекту. Таким чином, прикладені до матеріалу напруження усереднювали для значної кількості мікронадрізів. Тоді від локалізації напружень у різних западинах рельєфу залежать умови мікропластичності, а параметр  $\overline{K}_t$  є корисним для порівняльного оцінювання стану поверхні (рис. 4). У нашому випадку зміна мікротекстури поверхні залежить від початкового стану зразків та різнозеренності структури. Раніше встановили [17, 18], що зростання неоднорідності біохімічної корозії особливо властиве пластично деформованим ділянкам зі структурно-механічними дефектами.

Рис. 4. Коефіцієнт концентрації напружень початкової та пошкодженої поверхні зразків сталі 17Г1С-У за різних схем випробувань (див. табл.1): світлі стовпчики – початковий стан; темні – після біокорозійного пошкодження.

Fig. 4. Stress corrosion factor of the initial and damaged surfaces of the 17Г1С-У steel specimens under different test schemes (see Table 1): light columns represent initial state; dark – after biocorrosion damage.



Встановили, що концентратори напружень на досліджених біокородованих поверхнях не є небезпечні для елементів конструкцій (рис. 4), оскільки гострими вважають ті, в яких  $K_t > 4$  за одновісного навантаження. Для них розподіл локальних напружень в околі вершини такий самий, як і попереду вістря тріщини.

Отже, одержані результати дали можливість глибше зрозуміти та кількісно порівняти геометрію мікронерівностей, властивих біокорозійному пошкодженню, а умови “одночасності” його виникнення додатково підтвердили ефективність інгібіторів [19, 20].

### ВИСНОВКИ

Проаналізовано профілограми рельєфу поверхні біокородованих зразків сталі 17Г1С-У, виявлено та описано її морфологію за допомогою параметрів шорст-

кості. Запропоновано новий метод обчислення радіусів вершин заглибин рельєфу, які вважали множинними мікроконцентраціями напружень. Обчислено значення ефективних коефіцієнтів концентрації напружень за формулою Аролі-Рамулу з урахуванням радіусів вершин мікроконцентрацій, визначених за допомогою розробленого методу, що дало можливість додатково обґрунтувати ефективність пропонованих інгібіторів. Описаний підхід забезпечує кількісне порівняння властивостей контрольних ділянок лабораторних зразків та натурних конструкцій для оцінювання їх схильності до зародження тріщиноподібних дефектів.

*РЕЗЮМЕ.* Количественно оценены микромеханизмы биокоррозионного повреждения образцов трубной стали 17Г1С-У на основе сочетания подходов профилометрии и механики разрушения. Развита методика расчета коэффициентов концентрации напряжений как параметров локализации коррозионных микроконцентраторов напряжений. Усовершенствованный подход апробирован на профилограмме корродированной трубной стали. Обосновано, что с учетом концентрации напряжений в окрестности микронадрезов – углублений профилограмм можно оценить безопасные (допустимые) микрокоррозионные повреждения.

**Ключевые слова:** биокоррозия, анализ профилограмм, диагностика, концентрация напряжений.

*SUMMARY.* The micromechanisms of biocorrosion damage of the 17Г1С-У pipe steel samples are analyzed based on the combination of profilometry and fracture corrosion approaches. The methods of calculation of the stress concentration factors as parameters of localization of the stress corrosion microconcentrators are developed. The improved approach is approved on the profilogram of corroded pipe steel. It is substantiated that with account of the stress concentration in the vicinity of micronotches – cavities of profilograms it is possible to evaluate safe (admissible) microcorrosion damages.

**Keywords:** biocorrosion, profilogram analysis, diagnostics, stress concentration.

1. *Mechano-chemical effect of pipeline steel in microbiological corrosion / T. Wu, M. Yan, J. Xu, Y. Liu, C. Sun, W. Ke // Corros. Sci. – 2016. – 108. – P. 160–168.*
2. *Марущак П. О., Біщак Р. Т., Данилюк І. М. Тріщиностійкість матеріалів і конструкцій: тривалоексплуатовані магістральні газопроводи. – Тернопіль: ZAZAPRINT, 2016. – 184 с.*
3. *Валетов В. А., Иванов А. Ю. Микрогеометрия поверхностей деталей и их функциональные свойства // Изв. вузов. Приборостроение. – 2010. – 53, № 8. – С. 6–11.*
4. *Гибадуллин И. Н., Валетов В. А. Автоматизированный контроль микрогеометрии поверхностей деталей с помощью графических изображений профилей // Изв. вузов. Приборостроение. – 2017. – 60, № 3. – С. 287–289.*
5. *Гибадуллин И. Н., Валетов В. А. Изображение профиля поверхности как графический критерий оценки шероховатости // Изв. вузов. Приборостроение. – 2019. – 62, № 1. – С. 86–92.*
6. *Валетов В. А., Филимонова Е. А. Применение непараметрических критериев для оценки микрогеометрии при импульсном фрезеровании // Изв. вузов. Приборостроение. – 2014. – 57, № 8. – С. 52–54.*
7. *Arola D. and Williams C. L. Estimating the fatigue stress concentration factor of machined surfaces // Int. J. of Fatigue. – 2002. – 24 (9). – P. 923–930.*
8. *Реконструкція та кількісний аналіз металевих поверхонь з пітингами на основі удосконаленого методу погодження стереозображень / Б. П. Русин, Я. Ю. Варецький, Ю. В. Лисак, А. Ю. Похмурський // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – 47, № 2. – С. 126–133.*  
(*Reconstruction and quantitative analysis of metallic surfaces with pits based on improved stereo image matching method / B. P. Rusyn, Y. Y. Varets'kyi, Y. V. Lysak, A. Yu. Pokhmurs'kyi // Materials Science. – 2011. – 47, № 2. – P. 255–263.*)
9. *Неруйнівний контроль стану поверхонь, уражених корозійними пітингами / Б. П. Русин, Н. П. Ануфрієва, Н. Р. Грабовська, В. Г. Іванюк // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2013. – 49, № 4. – С. 90–96.*



- (*Nondestructive testing of the state of surfaces damaged by corrosion pitting* / В. Р. Rusyn, N. Р. Anufrieva, N. R. Hrabovs'ka, V. H. Ivanyuk // *Materials Science*. – 2014. – **49**, № 4. – Р. 516–524.)
10. *Методика* обработки профилеграмм с использованием вейвлет-фрактального анализа / А. В. Опрышко, М. Ю. Тарасов, И. А. Уткин, Ю. С. Андреев // *Вест. Пермск. нац. иссл. политехн. ун-та. Механика*. – 2011. – № 3. – С. 118–127.
  11. *Филимонова Е. А.* Разработка методики и программы автоматизированного контроля микрогеометрии поверхностей деталей приборов с помощью графических критериев и их использование в технологических исследованиях: Дис ... канд. техн. наук. – СПб: НИУ ИТМО, 2014. – 126 с.
  12. *Арутюнов П. А., Толстихина А. Л., Демидов В. Н.* Система параметров для анализа шероховатости и микрорельефа поверхности материалов в сканирующей зондовой микроскопии // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 1998. – **65**, № 9. – С. 27–37.
  13. *Крагельский И. В., Рудзит Я. А.* Методика определения средних значений радиусов закругления вершин неровностей профиля шероховатости // *Приборостроение*. – 1968. – № 3. – С. 15–24.
  14. *Марущак П. О., Литвиненко Я. В., Окіпний І. Б.* Методика та деякі результати оцінювання концентрації напружень на поверхні сталевих зразків з урахуванням параметрів її мікрогеометрії // *Пр. VI Міжнар. наук.-техн. конф. “Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування”*, 24–27 вересня 2019 р. – Тернопіль: ТНТУ, 2019. – С. 201–204.
  15. *Хамазы Л. А.* Обобщенная диаграмма предельных номинальных напряжений (предела выносливости) и соответствующих им размеров нераспространяющихся усталостных трещин для тупых и острых концентраторов // *Проблемы прочности*. – 2019. – № 3. – С. 33–61.  
(*Khamaza L. A.* Generalized diagram of the ultimate nominal stresses (endurance limit) and the corresponding dimensions of the non-propagating fatigue cracks for sharp and blunt notches // *Strength of Materials*. – 2019. – **51**. – Р. 350–360.)
  16. *Матвиенко Ю. Г.* Подходы механики разрушения к анализу допустимых дефектов в виде надрезов // *Проблемы прочности*. – 2010. – № 1. – С. 80–87.  
(*Matvienko Yu. G.* Approaches of fracture mechanics in the analysis of admissible defects in the form of notches // *Strength of Materials*. – 2010. – **42**. – Р. 58–63.)
  17. *Нові методи* аналізу електронно-мікроскопічних зображень та мікропрофілю поверхонь біокородованих сталевих зразків / П. Марущак, І. Коноваленко, В. Кравець, О. Романишин // *Матеріали VII наук.-техн. конф. “Інформаційні моделі, системи та технології”*, 11–12 грудня 2019 р. – Тернопіль: ТНТУ, 2019. – С. 66.
  18. *Polutrenko M. S., Maruschak P. O., and Prentkovskis O.* The role of the biological factor in the corrosion damage of the metal of underground oil and gas pipelines // *Proc. of the 20<sup>th</sup> Int. conf. “Transport means – 2016”* (October 5–7, Juodkrantė, Lithuania), 2016, Kaunas University of Technology. – Р. 424–427.
  19. *Методика* визначення областей підвищеної корозійної та біокорозійної активності як складова комплексного моніторингу нафтогазопроводів / Л. Я. Побережний, А. І. Станецький, М. С. Полутренко, П. О. Марущак // *Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. Володимира Даля*. – 2013. – № 13. – С. 161–166.
  20. *Зміна* несучої здатності матеріалу магістральних газопроводів в результаті експлуатаційної деградації / Л. Я. Побережний, А. І. Станецький, П. О. Марущак // *Матеріали міжнар. наук.-техн. конф. “Нафтогазова енергетика-2013”* (7–11 жовтня 2013 р.). – Івано-Франківськ: Івано-Франківськ. нац. техн. ун-т нафти і газу, 2013. – С. 251–253.

Одержано 28.11.2019